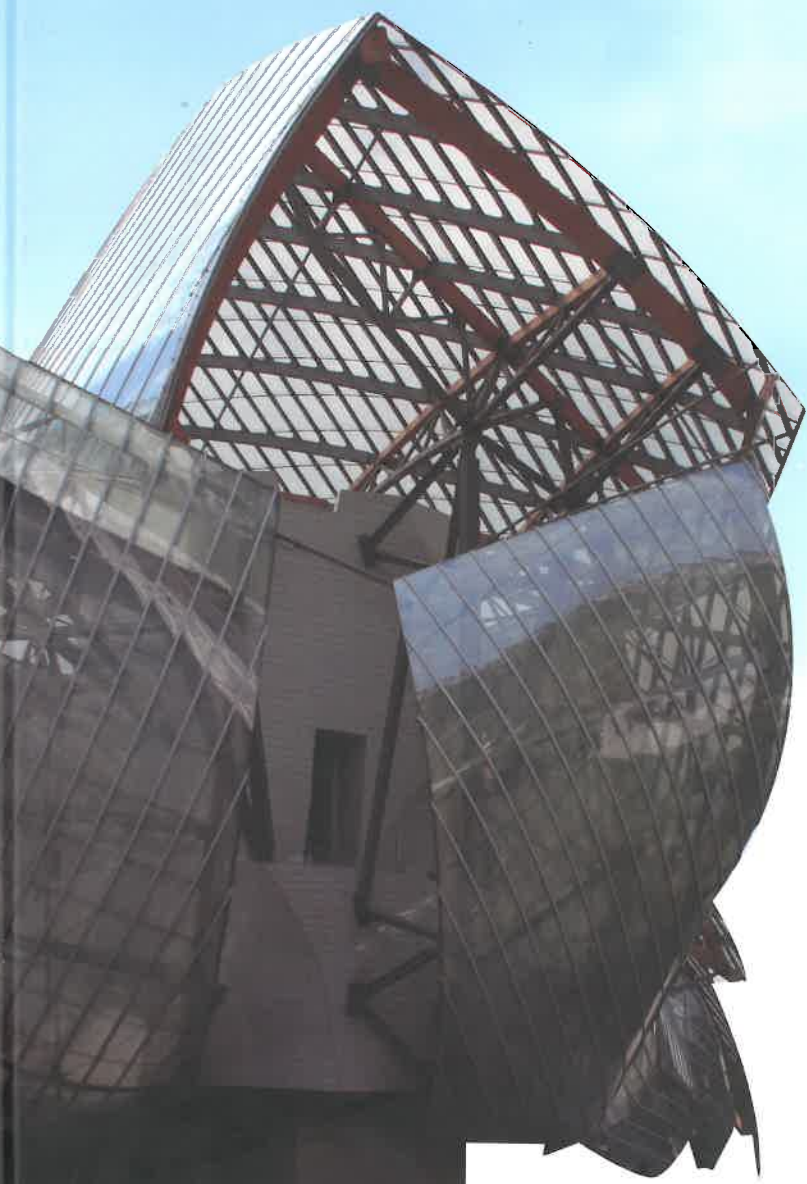


# XI CONGRESSO DE CONSTRUÇÃO METÁLICA E MISTA

TEMA ESPECIAL

A NOVA GERAÇÃO DE EUROCÓDIGOS



**Editores**  
Luís Simões da Silva  
Paulo Vila Real  
Paulo Piloto  
João Pedro Martins

## **XI Congresso de Construção Metálica e Mista**

Copyright © 2017

por Luís Simões da Silva, Paulo Vila Real, Paulo Piloto, João Pedro Martins

Editora:

**cmm** – Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista

Business Center Leonardo da Vinci

Coimbra iParque Lote 3

3040-540 Coimbra, Portugal

Tel.: +351 239 098 422; Tlm.: +351 965 061 249; Fax: +351 239 091 216

Email: [cmm@cmm.pt](mailto:cmm@cmm.pt)

Url: [www.cmm.pt](http://www.cmm.pt)

1ª Edição: Novembro 2017

Tiragem: 300 exemplares

Não é permitida a reprodução total ou parcial deste livro, o registo em suporte informático, ou a transmissão através de qualquer processo electrónico ou mecânico, sem a prévia autorização por escrito dos titulares dos direitos da edição.

Depósito legal: 434088/17

ISBN: 978-989-99226-6-2

Coordenação editorial: Luís Figueiredo Silva

Concepção gráfica da capa: 3LM

Formatação de conteúdos e paginação: Joana Filipe Albuquerque

Impressão: Sersilito, Empresa Gráfica Lda, Maia, Portugal

### **Nota da editora**

Este texto foi elaborado a partir da reprodução dos originais preparados pelos autores. Por conseguinte, a editora não pode aceitar qualquer responsabilidade pelo conteúdo, nem por possíveis erros no texto.

## Prefácio

O XI Congresso de Construção Metálica e Mista realiza-se num período em que o sector da Construção Metálica portuguesa se continua a afirmar como um motor de inovação e de internacionalização da indústria. Com um volume de negócios de cerca de 3.500 milhões de euros (2015) e um volume de exportações de cerca de 2,2% das exportações do país, podemos assegurar que presentemente este sector possui uma grande vitalidade, é tecnologicamente avançado e é detentor de uma forte capacidade competitiva internacional.

A CMM mantém, assim, a sua aposta na inovação tecnológica e a competitividade do sector, pretendendo potenciar uma plataforma de conciliação entre todos os atores do sector, em torno de uma estratégia e programa de ação definido para a consolidação do sector, com o foco no mercado global e potenciando o reconhecimento de excelência que detêm, contribuindo de forma decisiva para a afirmação da Construção Metálica Portuguesa a nível mundial como uma solução construtiva sustentável de alta qualidade e inovadora.

O XI Congresso de Construção Metálica e Mista é a maior e mais relevante conferência nacional de construção metálica e mista, com realização bienal e promovido pela CMM, e reúne projetistas, empresas do sector e investigadores, contando com a participação de conferencistas nacionais e internacionais de renome. No seguimento das edições anteriores o XI Congresso de Construção Metálica e Mista volta a apostar na promoção do uso de materiais de matriz metálica e mista na construção e assumir uma posição ativa da promoção da inovação no sector da construção metálica a nível nacional e internacional, bem como, difundir as mais recentes inovações no âmbito deste tipo de construção e dar a conhecer as linhas de orientação da investigação neste campo, fomentando o intercâmbio de experiências.

À semelhança das dez edições anteriores, o XI Congresso de Construção Metálica e Mista será composto por Sessão de Palestras e Sessões Científicas e Técnicas, por Seminários, Workshops e apresentações técnico-comerciais das empresas presentes, bem como uma Exposição Técnica, que conta com várias empresas e entidades relevantes do sector, sendo este um espaço privilegiado para a troca de experiências entre as empresas e os técnicos do sector.

A décima primeira edição do Congresso de Construção Metálica e Mista, é dedicada ao tema A Nova Geração de Eurocódigos, sensibilizando os técnicos da fileira da construção metálica para a importância da normalização, evidenciando os recentes desenvolvimentos das novas versões dos Eurocódigos. Nesta edição do congresso dar-se-á destaque também a dois temas de extrema importância para a construção metálica, através da realização de duas sessões temáticas, nomeadamente sobre arquitetura, onde serão apresentados alguns projetos premiados com utilização de estrutura metálica e sobre a economia do mar, salientando a importância que esta tem atualmente na construção metálica e apresentando as potencialidades de crescimento que a economia do mar poderá oferecer ao sector da construção metálica.

Luís Simões da Silva  
Presidente da CMM e da Comissão Organizadora do  
XI Congresso de Construção Metálica e Mista

## Prefácio

O XI Congresso de Construção Metálica e Mista realiza-se num período em que o sector da Construção Metálica portuguesa se continua a afirmar como um motor de inovação e de internacionalização da indústria. Com um volume de negócios de cerca de 3.500 milhões de euros (2015) e um volume de exportações de cerca de 2,2% das exportações do país, podemos assegurar que presentemente este sector possui uma grande vitalidade, é tecnologicamente avançado e é detentor de uma forte capacidade competitiva internacional.

A CMM mantém, assim, a sua aposta na inovação tecnológica e a competitividade do sector, pretendendo potenciar uma plataforma de conciliação entre todos os atores do sector, em torno de uma estratégia e programa de ação definido para a consolidação do sector, com o foco no mercado global e potenciando o reconhecimento de excelência que detêm, contribuindo de forma decisiva para a afirmação da Construção Metálica Portuguesa a nível mundial como uma solução construtiva sustentável de alta qualidade e inovadora.

O XI Congresso de Construção Metálica e Mista é a maior e mais relevante conferência nacional de construção metálica e mista, com realização bienal e promovido pela CMM, e reúne projetistas, empresas do sector e investigadores, contando com a participação de conferencistas nacionais e internacionais de renome. No seguimento das edições anteriores o XI Congresso de Construção Metálica e Mista volta a apostar na promoção do uso de materiais de matriz metálica e mista na construção e assumir uma posição ativa da promoção da inovação no sector da construção metálica a nível nacional e internacional, bem como, difundir as mais recentes inovações no âmbito deste tipo de construção e dar a conhecer as linhas de orientação da investigação neste campo, fomentando o intercâmbio de experiências.

À semelhança das dez edições anteriores, o XI Congresso de Construção Metálica e Mista será composto por Sessão de Palestras e Sessões Científicas e Técnicas, por Seminários, Workshops e apresentações técnico-comerciais das empresas presentes, bem como uma Exposição Técnica, que conta com várias empresas e entidades relevantes do sector, sendo este um espaço privilegiado para a troca de experiências entre as empresas e os técnicos do sector.

A décima primeira edição do Congresso de Construção Metálica e Mista, é dedicada ao tema A Nova Geração de Eurocódigos, sensibilizando os técnicos da fileira da construção metálica para a importância da normalização, evidenciando os recentes desenvolvimentos das novas versões dos Eurocódigos. Nesta edição do congresso dar-se-á destaque também a dois temas de extrema importância para a construção metálica, através da realização de duas sessões temáticas, nomeadamente sobre arquitetura, onde serão apresentados alguns projetos premiados com utilização de estrutura metálica e sobre a economia do mar, salientando a importância que esta tem atualmente na construção metálica e apresentando as potencialidades de crescimento que a economia do mar poderá oferecer ao sector da construção metálica.

Luís Simões da Silva  
Presidente da CMM e da Comissão Organizadora do  
XI Congresso de Construção Metálica e Mista

## **Comissão de Honra**

Exma. Sra. Ministra do Mar  
Professora Ana Paula Vitorino

Exmo. Sr. Secretário de Estado Adjunto e do Ambiente  
Professor José Gomes Mendes

## **Comissão Organizadora**

Luís Simões da Silva, CMM  
Paulo Piloto, IPB  
João Pedro Martins, UC

## **Comissão Científica**

Paulo Vila Real, UA  
Abílio de Jesus, FEUP  
Aldina Santiago, UC  
Alexandra Feliz, O FELIZ  
Alfredo Dias, UC  
Altino Loureiro, UC  
António Adão da Fonseca, FEUP  
António Baptista, LNEC  
António Matos Silva, MARTIFER SA  
António Reis, IST  
Carlos Martins, MARTIFER SA  
Carlos Poço, O POÇO SA  
Carlos Rebelo, UC  
Constança Rigueiro, UC  
Dinar Camotim, IST  
Elsa Caetano, FEUP  
Filipe Santos, VESAM  
Francisco Virtuoso, IST  
Helena Gervásio, UC  
Isabel Valente, UM  
João Almeida Fernandes, LNEC  
João Paulo Rodrigues, UC  
João Pedro Martins, UC  
João Rocha de Almeida, UNL  
Jorge Paiva, CIN

José Clemente, REFER  
José Miguel Castro, FEUP  
José Oliveira Pedro, IST  
Leonor Côrte-Real, HEMPEL  
Luís Borges, STRUCTURAME  
Luís Bragança, UM  
Luís Calado, IST  
Luís Câncio, J.L. CÂNCIO MARTINS, LDA  
Luís Godinho, UC  
Luís Simões da Silva, UC  
Manuel Peixoto, FERPINTA  
Manuela Salta, LNEC  
Nuno Lopes, UA  
Nuno Silvestre, IST  
Paulo Cruz, UM  
Paulo Piloto, IPB  
Paulo Santos, UC  
Rodrigo Gonçalves, UNL  
Rui Alves, PROINDUSTRIAL  
Rui Simões, UC  
Sandra Jordão, UC  
Tiago Abecasis, TAL PROJECTO, Lda  
Tiago Mendonça, BETAR  
Vítor Murtinho, UC

## **Comissão Executiva**

Luís Figueiredo Silva, CMM  
Ana Almeida, CMM  
Joana Albuquerque, CMM  
Zínia Antunes, CMM

**CMM** Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista | **FEUP** Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto | **IPB** Instituto Politécnico de Bragança | **IST** Instituto Superior Técnico | **LNEC** Laboratório Nacional de Engenharia Civil | **REFER** Rede Ferroviária Nacional | **UA** Universidade de Aveiro | **UC** Universidade de Coimbra | **UM** Universidade do Minho | **UNL** Universidade Nova de Lisboa

## Índice

Prefácio	v
Comissões	vii
Patrocínios	ix
Índice	xxi
Índice de Autores	xxxii

### Conferências

<i>Advances in steel structures and steel materials in Japan</i>	3
Ryoichi Kanno	
<i>Estruturas especiais em secção soldada: desenvolvimentos e realizações</i>	13
António Reis	
<i>Next generation of Eurocode 3 – evolution by improvements and harmonization</i>	15
Ulrike Kuhlmann   Christina Schmidt-Rasche	
<i>Recent developments regarding the next version of Eurocode 3 part 1-1 on steel structures</i>	25
H. H. Snijder	

### Comunicações

#### A Construção em Aço na Indústria Petrolífera, Mineira e na Produção de Energias Renováveis

<i>Análise probabilística simplificada para a estimação da vida à fadiga de uma estrutura offshore fixa</i>	51
Tiago P. Ribeiro   Constança Rigueiro   Luís Borges	
<i>Aplicação da mecânica da fractura numa análise determinística para a estimação da vida à fadiga de uma estrutura offshore fixa</i>	63
Tiago P. Ribeiro   Constança Rigueiro   Luís Borges	
<i>Assessment of blast loads on offshore topsides using analytical models: case study</i>	75
Damjan Čekerevac   Constança Rigueiro   Eduardo Pereira	
<i>Metodologia semi-analítica para a previsão do comportamento pós-encurvadura de painéis curvos cilíndricos sob compressão uniaxial</i>	85
Tiago Manco   João P. Martins   Constança Rigueiro   Luís S. Silva	
<i>Metodologias de análise da interação fluido-estrutura (FSI) em estruturas offshore</i>	95
Daniel Oliveira   Aldina Santiago   Constança Rigueiro	
<i>New concepts for the transition piece of the hybrid lattice/tubular wind turbine tower</i>	105
Mohammad R. S. Mohammadi   Carlos Rebelo   Milan Veljković   Luís S. Silva	
<i>Robustness, redundancy and progressive collapse of fixed offshore structures</i>	115
Miguel Refachinho   Constança Rigueiro   João P. Martins   Rui Matos	

## Arquitetura e Aço

- A new urban management model applied to Baixa of Coimbra, Portugal* 127  
Jocelyn E. R. Nieto | Constança Rigueiro | Luís S. Silva | Vítor Murtinho
- Aeroporto de Lyon e Hipódromo de Longchamp. O aço como peça arquitetónica* 137  
Nuno Neves | Maria Sarmento
- Necessary modifications to EC3 for design and calculation of built-up pillars* 147  
Jaime M. Mendívil | Luis J. M. García
- Optimised design of high voltage lattice transmission towers* 159  
José D. Mota | Luís Macedo | José M. Castro
- Steel and modularity in architectural creation* 169  
A. L. Correia | Vítor Murtinho | Luís S. Silva

## Eficiência Energética e Sustentabilidade de Edifícios Metálicos

- Centro sportivo IESGO: uma obra sustentável para a cidade de Formosa (Goiás/Brasil)* 181  
Eduardo N. Manzi
- Desempenho térmico de um sistema de ventilação com permutador de calor solo-ar* 189  
Nuno Rosa | Paulo Santos | José Costa | Helena Gervásio | Luís S. Silva
- Determinação experimental do coeficiente de transmissão térmica de uma parede com estrutura leve em aço enformado a frio* 199  
Cláudio Martins | Margarida Gonçalves | Paulo Santos | José Costa | Nelson Soares | Luís S. Silva
- Edifícios com estrutura leve em aço enformado a frio (LSF): vantagens e desvantagens do sistema* 209  
Cláudio Martins | Nuno Rosa | Paulo Santos | Luís S. Silva
- Estado limite de sustentabilidade: uma nova abordagem na avaliação ambiental de estruturas. Aplicação às estruturas metálicas* 219  
Helena Gervásio | Silva Dimova
- Materiais de mudança de fase (PCMs) para melhoria da eficiência energética de edifícios com estrutura metálica leve (LSF)* 227  
Ana M. G. Gonçalves | Paulo Santos | Nelson Soares | José J. Costa
- Resistência mecânica de painéis com estrutura leve em aço (LSF) sujeitos a cargas laterais* 237  
Nuno Rosa | Cláudio Martins | José Henriques | Helena Gervásio | Paulo Santos | Luís S. Silva
- SBRI+ – Desenvolvimento de uma aplicação informática para a análise da sustentabilidade de pontes rodoviárias* 247  
Jorge Teixeira | Constança Rigueiro | Helena Gervásio | Luís S. Silva

## Execução e Gestão da Qualidade da Construção em Aço

- Garantia e controlo de qualidade de acordo com a EN 1090 – dois casos práticos* 259  
Joana M. M. Gomes

<i>Monitoramento de controle das tensões mecânicas atuantes na estrutura metálica de cobertura em balanço do Museu do Amanhã durante seu descimbramento – Rio de Janeiro – Brasil</i>	269
Fabio G. Costa   João Paulo F. M. de Souza	

## Grandes Projetos

<i>A estrutura metálica em 2017 e em 2027</i>	281
Filipe Santos   Gualter Martins   Tânia Silva   Paulo Carrapito	
<i>Ampliação e remodelação do Aeroporto de Faro estruturas do grande hall</i>	291
Rui N. Silva   Tiago Abecasis	
<i>Arena Juventude – jogos olímpicos RIO2016</i>	301
Rui Mestre   Marta Gameiro	
<i>Cobertura do pavilhão João Rocha Sporting Clube de Portugal</i>	311
Adriano Lopes   Ricardo Pimentel   Sílvio Gonçalves	
<i>Edifício A9B em Paris – concepção e execução</i>	323
Nuno Neves   Rui Ribeiro   Marco Baptista	
<i>Estação Antártica Comandante Ferraz</i>	333
Rui Furtado   Filipe Arteiro   Mauro Monteiro	
<i>Nova sede da EDP</i>	343
Rui Furtado   Miguel Pereira   Armando Vale	
<i>O novo Museu de Arte, Arquitetura e Tecnologia</i>	353
Rui Furtado   Miguel Pereira	
<i>Operações de descimbramento de estruturas metálicas de grande porte: simulação numérica &amp; exemplos</i>	363
Daniel L. Oliveira   Flavio Rubin   Nelson S. Galgoul	
<i>Projecto A9A2 em Paris – concepção e execução</i>	373
Nuno Neves   Pedro Moás   Guilhermina Barreto   Francisco Pimenta	
<i>Proposta de recuperação de uma viga de rolamento com 40 anos de utilização através do MEF</i>	383
José G. A. Silva   Antônio M. C. de Gouvea   Lucas T. Araújo	
<i>Upon Lisbon prime residences</i>	393
Adriano Lopes   Sílvio Gonçalves   Ricardo Pimentel	

## Integridade Estrutural de Pontes Metálicas Antigas

<i>Design fatigue crack growth curves for reinforced and unreinforced structural details</i>	407
P. C. Raposo   G. Lesiuk   J. A. F. O. Correia   A. M. P. Jesus   Rui Calçada   W. Błażejowski   M. Katkowski	
<i>Fatigue characterization of structural resins used in reinforcement of old steel bridges</i>	417
M. Rodrigues   P. C. Raposo   B. Pedrosa   J. A. F. O. Correia   S. Blasón   M. Calvente   A. M. P. Jesus   Carlos Rebelo   Rui Calçada   A. Fernández-Canteli	
<i>Fatigue design curves of materials collected from old Portuguesees metallic bridges</i>	425
M. Cardani   J. A. F. O. Correia   I. B. Valente   G. Lesiuk   A. M. P. Jesus   Rui Calçada	

<i>Fatigue resistance of reinforced and unreinforced steel connections</i>	437
B. Pedrosa   P. Raposo   J. A. F. O. Correia   Carlos Rebelo   Helena Gervásio   A. M. P. Jesus   Rui Calçada   Luís S. Silva	
<i>Overview on numerical simulation of riveted and bolted connections</i>	445
B. Pedrosa   J. A. F. O. Correia   P. Raposo   G. Lesiuk   Carlos Rebelo   A. M. P. Jesus   Rui Calçada   Luís S. Silva	
<i>Structural degradation of puddle irons and steels from old riveted metallic structures</i>	453
P. Raposo   M. Duda   G. Lesiuk   J. A. F. O. Correia   I. Valente   A. M. P. Jesus   Rui Calçada	

## **Pontes Metálicas e Mistas**

<i>Análise dinâmica experimental e numérica de passarelas de pedestres mistas (aço-concreto) submetidas ao caminhar de pedestres</i>	465
Irwing A. R. da Silva   José G. S. da Silva	
<i>Análise longitudinal de tabuleiros em caixão mistos aço-betão: comparação entre as formulações clássicas e a teoria generalizada de vigas</i>	475
Luís Vieira   José O. Pedro   Rodrigo Gonçalves	
<i>Avaliação à fadiga de um viaduto ferroviário misto (aço-betão) sob tráfego de alta velocidade pelo método das tensões Hot-Spot</i>	485
Gonçalo Ferreira   Guilherme Alencar   José G. S. da Silva   Abílio de Jesus   Rui Calçada	
<i>Dimensionamento de tabuleiros rodoviários mistos aço-betão utilizando o aço de alta resistência S 690 QL</i>	495
José O. Pedro   Carlos Vieira   Cláudio Baptista   António Reis   Francisco Virtuoso	
<i>Estado da arte em pontes incluindo painéis metálicos cilíndricos na secção transversal</i>	503
André Biscaya   José O. Pedro   João P. Martins   Luís S. Silva   António Reis	
<i>Fatigue life assessment of welded cover plate by using global and local approaches</i>	513
Ivan Lukačević   Boris Fuštar   Darko Dujmović	
<i>Impactos operacionais da restrição de velocidade em pontes ferroviárias</i>	521
João Junqueira   Caio Reis   Marina Donato   Moniz de Aragão Filho   Silveira Lopes	
<i>Nova ponte ferroviária sobre o Rio Umbeluzi, Moçambique</i>	531
Tiago Mendonça   Manuel Almeida   Bruno Rodrigues	
<i>Novas soluções de pontes modulares para vãos até 120 m</i>	541
António André   Diogo Carvalho   Pedro Pacheco	
<i>Ponte ciclável de Ijzerlaan – pluralidade geométrica e estrutural</i>	551
Ricardo Afecto   Nuno Lopes   António Reis	
<i>Porto de Antioquia (Colômbia) – Viaduto de acesso a plataforma offshore. Estacas metálicas cravadas a 80 m</i>	563
João A. Fonseca   Luis M. Rubio   Carlos Gordo   A. Adão da Fonseca   Pedro Neto   Renato Bastos   Patrícia Almeida	
<i>Reabilitação de pontes metálicas em fim de ciclo de vida</i>	573
Ricardo Breda   Carlos Rebelo	
<i>Reforço da ponte de Soure ao km 216.891 do ramal de Alfarelos</i>	583
Nuno Travassos   Julio Appleton   Rui Pombo   Pedro Campos	

<i>Seismic response of steel moment frames with semi-continuous joints</i>	593
Atsushi Sato   František Wald	
<i>Viaduto de acesso à autopista Presidente Arturo Illia, em Buenos Aires – Argentina</i>	603
Pedro Morujão   Tiago Alves   A. Adão da Fonseca	
<b>Segurança Estrutural e Desempenho de Novos Materiais e Produtos</b>	
<i>An innovative mono-fastener anchor plate for applications in seismic zones</i>	615
Giovanni Muciaccia   Giuseppe Di Nunzio   Andrea Consiglio	
<i>Análise comparativa de tipologias para pontes pedonais em vidro estrutural – aplicação a um caso de estudo</i>	625
Rui Andrade   Constança Rigueiro   Sandra Jordão	
<i>Análise de encurvadura de colunas constituídas por perfis de aço enformado a frio</i>	635
Hélder D. Craveiro   João N. Ribeiro   Ricardo Breda	
<i>Análise dos modelos de verificação do esforço transversal em lajes mistas de aço e betão</i>	645
Miguel Pereira   Rui Simões   João Duarte	
<i>Análise e dimensionamento de vigas mistas tipo slimfloor</i>	655
Ricardo Pimentel   Rui Simões   Luís S. Silva	
<i>Avaliação da probabilidade de colapso de pórticos metálicos dimensionados de acordo com o EC8</i>	667
Luís Macedo   António Silva   José M. Castro	
<i>Avaliação experimental do comportamento de colunas tubulares em ligações a vigas I com perfis em U invertidos</i>	677
Luís Magalhães   Carlos Rebelo   Sandra Jordão	
<i>Bases para a generalização do método das componentes a carregamentos cíclicos em ligações viga-coluna com chapa de extremidade</i>	687
Hugo Augusto   José M. Castro   Carlos Rebelo   Luís S. Silva	
<i>Behaviour of bobtail bolts installed in overlapping friction connections for steel wind towers – initial losses</i>	699
Rui Matos   M. R. Shah Mohammadi   Carlos Rebelo	
<i>Buckling resistance of partially encased columns under fire</i>	707
Paulo Piloto   Ricardo Hoffstaeter   Ronaldo Rigobello   Amari Soufyane   Nourredine Benlakehal	
<i>Caracterização do adesivo estrutural sikaforce 7710 L100</i>	717
Alexandre Rodrigues   Sandra Jordão   Vitor D. da Silva   Dulce Rodrigues   Carlos Leitão	
<i>Caracterização experimental de parafusos hollo-bolt à tracção e comparação analítico-experimental em juntas viga I – pilar SHS</i>	725
Afonso C. B. Mesquita   Luís S. Silva   Sandra Jordão	
<i>Comparação do método da secção efetiva e do método da tensão reduzida no dimensionamento de placas metálicas esbeltas</i>	735
Francisco Branco   José P. Fernandes   José M. Castro	
<i>Comparison of design for composite beams in steel and concrete according to Eurocode 4 and Chinese Design Codes</i>	745
Qingjie Zhang   Markus Schäfer	

<i>Conceção e dimensionamento de ligações – dois casos práticos</i>	755
Tiago Soares   Maria Sarmento   Ricardo Justiniano	
<i>Contribuição para o estudo do comportamento ao fogo de pilares de aço com gradientes transversais de temperatura</i>	765
António M. Correia   João P. Rodrigues   José P. Correia	
<i>Desenvolvimento de um novo perfil omega em aço enformado a frio</i>	775
Rui Simões   Helder Fernandes   Miguel Pereira   Helder Craveiro   Aldina Santiago	
<i>Dimensionamento ao fogo de vigas C em aço enformado a frio à encurvadura lateral</i>	785
Luís Laím   João P. Rodrigues	
<i>Effect of an interface defect in a patch/layer joint under dynamic time harmonic load</i>	795
Elisaveta G. Kirilova   Wilfried Becker   Jordanka A. Ivanova   Tatyana S. Petrova	
<i>Ensaaios de tração em obra para sistemas de ancoragem em betão e alvenaria</i>	805
Gonçalo V. C. D. Carvalho   Sílvia A. Martins	
<i>Estudo numérico do comportamento cíclico de colunas curtas tubulares mistas aço-betão com agregados de borracha</i>	813
António P. C. Duarte   Nuno Silvestre   Jorge de Brito   Eduardo Júlio	
<i>Estudo paramétrico da resistência ao fogo de vigas-coluna em aço inoxidável austenítico com secções tubulares</i>	823
Nuno Lopes   Mónica Manuel   Ana R. Sousa   Paulo V. Real	
<i>Estudos do comportamento à flexão de vigas de perfis de aço enformado a frio tipo omega (projeto XBeam)</i>	833
Luís C. Prola   Carlos F. G. J. Carvalho   João P. V. Pereira   Rui B. Ruben	
<i>Experimental analysis of unstiffened cylindrically curved panels</i>	843
Filip Ljubinkovic   João P. Martins   Helena Gervásio   Luís S. Silva   Carlos Leitão	
<i>Fire resistance of non-loadbearing light steel framing walls: numerical validation</i>	853
Mohamed Khetata   Luiz Fernandes   César Marinho   Paulo Piloto   Ana Gavilán   Henrique Razuk	
<i>Formulação da teoria generalizada de vigas para calcular cargas de bifurcação lateral-distorcional em vigas mistas aço-betão</i>	863
David Henriques   Rodrigo Gonçalves   Dinar Camotim	
<i>Formulação de Ayrton-Perry para a resistência à encurvadura de vigas-coluna prismáticas em aço</i>	875
Trayana Tankova   Luís S. Silva   Liliana Marques	
<i>Implementação computacional de um modelo baseado em componentes para previsão do comportamento cíclico de juntas viga-coluna metálicas</i>	885
Sara Oliveira   Hugo Augusto   Ricardo Costa   Carlos Rebelo   Yukihiro Harada   Luís S. Silva	
<i>Influence of the degree of shear connection on the load carrying capacity of a composite beam in fire</i>	895
Samuel Pfenning   Jürgen Tresch   Luca Pennisi   Sven Brunkhorst   Martin Mensinger	
<i>Interação (M-V) em vigas metálicas esbeltas axialmente comprimidas</i>	905
André Biscaya   José O. Pedro	

<i>Interação local-distorcional-global em colunas z, “hat” e “rack”: comportamento e dimensionamento através do método da resistência directa</i>	913
Pedro B. Dinis   Dinar Camotim	
<i>Ligações resistentes à flexão entre vigas de secção aberta e pilares de secção tubular</i>	923
Guiomar Vicente   Rui Simões   Carlos Rebelo	
<i>Long-term effects on structural glass beams</i>	933
Teresa Rodrigues   Sandra Jordão   Chiara Bedon	
<i>mCalcLSF: um programa para modelação, análise, dimensionamento e projeto de estruturas light steel framing</i>	943
Paulo R. M. Carvalho   Giovana D. Barbosa   Jonabe P. Passos	
<i>Modeling of smart patch/layers joints under dynamic time harmonic load with interface defect</i>	953
Tatyana S. Petrova   Wilfried Becker   Elisaveta G. Kirilova   Jordanka A. Ivanova	
<i>Momentos flectores críticos – uma comparação de métodos analíticos e numéricos simples com análises lineares de estabilidade usando o MEF</i>	963
Tiago P. Ribeiro   João P. Martins   Hélder Craveiro	
<i>Numerical investigation of high strength steel connections between polygonal built-up members</i>	975
Slobodanka Jovašević   Carlos Rebelo	
<i>Perfil de alma corrugada sinusoidal</i>	983
Vasco Lemos   Sérgio Matos	
<i>Prevenção de fadiga em cimbres autolançáveis – proposta de abordagem integrada</i>	999
Hugo E. N. S. Coelho   Pedro A. R. C. Pacheco   Antonio A. M. S. Torres   José C. F. Moreira   José M. S. Soares	
<i>Probabilistic failure analysis of high steel frames with tuned mass damper</i>	1009
Farshid Farrokhi   Sepideh Rahimi	
<i>Seismic performance of steel moment frame office buildings with rectangular concrete-filled steel tube gravity columns</i>	1017
Nipun Pakwan   John Judd	
<i>Shear stresses analysis at the steel-concrete interface with the usage of bond eliminating products</i>	1027
Maciej Chrzanowski   Christoph Odenbreit   Renata Obiala   Teodora Bogdan	
<i>Structural behavior of full-scale beam-to-girder joints having composite slab under gravity load</i>	1037
Masaki Arita   Satoshi Kitaoka   Ryoich Kanno   Koji Hanya	
<i>Sufficient choice of material to avoid brittle fractures of foundation components of offshore wind power plants made of steel in accordance with EC3 part 1-10</i>	1047
Bertram Kühn   Tim Krieglstein	
<i>Temperaturas críticas de perfis metálicos de secção transversal de classe 4</i>	1059
Élio F. G. Maia   Carlos A. S. Couto   Paulo V. Real   Nuno Lopes	
<i>Three-dimensional macro-modelling of rectangular hollow section beam-to-column joints</i>	1069
Filipe J. S. D. R. Simões   Yukihiko Harada   Luís S. Silva	

*Um método global para a verificação da segurança de colunas e vigas contínuas de aço* 1079  
Rodrigo Gonçalves | Dinar Camotim

**Soluções Industrializadas para a Construção de Edifícios**

*Análise experimental do comportamento de conectores de chapa nervurada* 1093  
Isabel B. Valente | Sérgio Fernandes | Hidelbrando F. Diógenes

*Comportamento estrutural de sistema modular constituído por painéis de óxido de magnésio* 1103  
Luís C. Prola | Tiago F. R. Lopes

## Índice de Autores

### A

Abecasis, T.	291
Afecto, R.	551
Alencar, G.	485
Almeida, M.	531
Almeida, P.	563
Alves, T.	603
Andrade, R.	625
André, A.	541
Appleton, J.	583
Aragão Filho, M.	521
Araújo, L. T.	383
Arita, M.	1037
Arteiro, F.	333
Augusto, H.	687, 885

### B

Baptista, C.	495
Baptista, M.	323
Barbosa, G. D.	943
Barreto, G.	373
Bastos, R.	563
Becker, W.	795, 953
Bedon, C.	933
Biscaya, A.	503, 905
Blasón, S.	417
Błażejowski, W.	407
Bogdan, T.	1027
Borges, L.	51, 63
Branco, F.	735
Breda, R.	573, 635
Brito, J.	813
Brunkhorst, S.	895

### C

Caçada, R. A. B.	407, 417, 425, 437, 445, 453, 485
Calvente, M.	417
Camotim, D.	863, 913, 1079
Campos, P.	583
Cardini, M.	425
Carrapito, P.	281
Carvalho, C. F. G. J.	833
Carvalho, D.	541
Carvalho, G. V. C. D.	805
Carvalho, P. R. M.	943
Castro, J. M.	159, 667, 687, 735

Čekerevac, D.	75
Chrzanowski, M.	1027
Coelho, H. E. N. S.	999
Consiglio, A.	615
Correia, A. L.	169
Correia, A. M.	765
Correia, J. A. F. O.	407, 417, 425, 437, 445, 453
Correia, J. P.	765
Costa, F. G.	269
Costa, J.	189, 199, 227
Costa, R.	885
Couto, C. A. S.	1059
Craveiro, H.	635, 775, 963

### D

Dimova, S.	219
Dinis, P. B.	913
Diógenes, H. F.	1093
Donato, M.	521
Duarte, A. P. C.	813
Duarte, J.	645
Duda, M.	453
Dujmović, D.	513

### F

Farrokhi, F.	1009
Fernandes, H.	775
Fernandes, J. P.	735
Fernandes, L.	853
Fernandes, S.	1093
Fernández-Canteli, A.	417
Ferreira, G.	485
Fonseca, A. A.	563, 603
Fonseca, J. A.	563
Furtado, R.	333, 343, 353
Fuštar, B.	513

### G

Galgoul, N. S.	363
Gameiro, M.	301
García, L. J. M.	147
Gavilán, A.	853
Gervásio, H.	189, 219, 237, 247, 437, 843
Gomes, J. M. M.	259
Gonçalves, M.	199, 227



## BUCKLING RESISTANCE OF PARTIALLY ENCASED COLUMNS UNDER FIRE

Paulo Piloto <sup>a</sup>, Ricardo Hoffstaeter <sup>b</sup>, Ronaldo Rigobello <sup>b</sup>, Amari Soufyane <sup>c</sup>, Nourredine Benlakehal <sup>c</sup>

<sup>a</sup> *Polytechnic Institute of Bragança, Portugal.*

<sup>b</sup> *Federal University of Technology, Brazil.* <sup>c</sup> *University Hassiba Benbouali Chlef, Algeria.*

**Abstract.** The fire resistance of partially encased columns depends on the temperature evolution during fire exposure. This work aims to evaluate the effect of the balanced summation model on the design of the buckling load of Partially Encased Columns under fire situation. New improvements will be presented to assess fire resistance, suggesting some modification in the Annex G of Eurocode EN 1994-1-2.

The advanced calculation method is based on the 3D modelling of the Partially Encased Column, using steel profiles ranging from IPE200 to IPE500 and HEB160 to HEB500, and using different buckling lengths. An incremental and interactive procedure is used to solve the geometric and material non-linear behavior. The temperature effect is taken into account, using the uncouple thermal-structural analysis.

The results obtained by the numerical simulations are in good agreement with the new simple calculation method and are also useful to prescribe the buckling curve that best fits the 3D simulation results.

### 1. Introduction

The economic and social development in the world today is so big that it would be impossible to imagine everyday life without the use of steel and concrete. Every day, new infrastructures such as ports, airports, highways, railways, buildings, among others, show the evolution that society is going through. The characteristics of steel and concrete made possible the advances in the process of systematization of construction methods. The use of these materials transformed the construction industry into a gigantic market, placing technological development and scientific research on these materials on another level.

Partially encased columns (PEC) are normally made of hot rolled steel profiles, reinforced with concrete between the flanges. The composite section is responsible to increase the torsional and bending stiffness without increasing the section dimension, when compared to the same section of steel profile, being the concrete portion very significant to increase the fire resistance.

Since the thermal conductivity of concrete is relatively small, the temperature field in the composite cross section is highly non-uniform. There is no simplified method available to the heat transfer analysis, therefore the numerical simulation is required to analyse the fire effect.

The fire resistance of PEC depends on the evolution of temperature during exposure to fire. This work aims to evaluate the effect of the balanced summation model on the design of the buckling load of partially encased columns under fire situation, in accordance with European standards. New formulations will be presented to assess fire resistance [1], suggesting changes in some aspects prescribed in Annex G of Eurocode EN 1994-1-2 [2].

The simplified method is based on new formulations for specific rating times of resistance to fire: R30, R60, R90 and R120 minutes under the standard fire curve determined by ISO834 [3]. The new formulations are proposed to determine the buckling load and to evaluate with more accuracy the temperature, used to determine the average flange temperature, the residual height and temperature of the web based on 400°C isotherm, the residual cross section and temperature of concrete based on 500°C isotherm, and finally the reduced stiffness and strength of reinforcement.

The advanced calculation method (ANSYS), is based on the 3D modelling of the PEC, using two types of structural profiles: IPE200 to IPE500 and HEB160 to HEB500.

The buckling resistance, the critical load and the axial plastic resistance are calculate for columns with heights of 3m and 5m, with three different boundary conditions, pinned end at extremities, fixed ends at extremities and mixed at extremities. The effective length of the column  $L_0$  for the ultimate limit state may be different from that considered at room temperature. Eurocode takes into consideration the fact that the surrounding cold part of the structure can provide unchanged rotation stiffness, leading to effective buckling lengths of 0.5L, fixed ends and 0.7L, with mixed ends. Nevertheless, authors decided to evaluate the effective buckling length of 1.0L, using pinned extremities as well.

The materials used for the calculations were selected according to the most commonly used in practice, being the steel grade S275 for the cross section of the profile, steel grade S500 for reinforcement and concrete grade C20/25 for the encasement. The cross sections were define according to the tabulated data to design partially encased columns under fire conditions.

The Finite Element Method provides the numerical results of the modelling by incremental and interactive process. In this numerical simulation, the thermal and structural models are uncoupled. The results obtained by the elastic buckling analysis were compare with the results from the balanced summation method.

## 2. Balanced summation method

The EN 1994-1-2 prescribe, for the calculation of the design value, the plastic resistance to axial compression and of the effective flexural stiffness in the fire situation. The simplified calculation method, originally developed by Jungbluth [4], is used to calculate the fire resistance of the PEC, dividing the cross section in four components: flanges, web, reinforcement and concrete, according figure 1.



Fig. 1: Partially encased columns and the balanced summation model under fire

Table 1 presents the main dimensions of the cross sections, the number of rebars used and their respective diameters and the concrete cover dimensions in both principal directions.

**Table 1:** Characteristics of the sections under study

Profile	Bars (n)	h <sub>i</sub>	Φ (mm)	A <sub>s</sub> (mm <sup>2</sup> )	A <sub>c</sub> (mm <sup>2</sup> )	u <sub>1</sub> (mm)	u <sub>2</sub> (mm)	u (mm)	A <sub>s</sub> / A <sub>s</sub> + A <sub>c</sub>	t <sub>w</sub> / t <sub>f</sub>	A <sub>m</sub> /V (m <sup>-1</sup> )
HEB160	4	134.0	12	452	19916	40	40	40	2.22	0.62	25.00
HEB180	4	152.0	12	452	25616	40	40	40	1.74	0.61	22.22
HEB200	4	170.0	20	1257	31213	50	50	50	3.87	0.60	20.00
HEB220	4	188.0	25	1963	37611	50	50	50	4.96	0.59	18.18
HEB240	4	206.0	25	1963	45417	50	50	50	4.14	0.59	16.67
HEB260	4	225.0	32	3217	53033	50	50	50	5.72	0.57	15.38
HEB280	4	244.0	32	3217	62541	50	50	50	4.89	0.58	14.29
HEB300	4	262.0	32	3217	72501	50	50	50	4.25	0.58	13.33
HEB320	4	279.0	32	3217	77275	50	50	50	4.00	0.56	12.92
HEB340	4	297.0	40	5027	80509	50	50	50	5.88	0.56	12.55
HEB360	4	315.0	40	5027	85536	50	50	50	5.55	0.56	12.22
HEB400	4	352.0	40	5027	95821	70	50	55	4.98	0.56	11.67
HEB450	4	398.0	40	5027	108801	70	50	55	4.42	0.54	11.11
HEB500	4	444.0	40	5027	121735	70	50	55	3.97	0.52	10.67
IPE200	4	183.0	12	452	16823	50	40	45	2.62	0.66	30.00
IPE220	4	201.6	20	1257	19730	50	40	45	5.99	0.64	27.27
IPE240	4	220.4	20	1257	23825	50	40	45	5.01	0.63	25.00
IPE270	4	249.6	25	1963	30085	50	40	45	6.13	0.65	22.22
IPE300	4	278.6	25	1963	37848	50	40	45	4.93	0.66	20.00
IPE330	4	307.0	25	1963	44854	50	40	45	4.19	0.65	18.56
IPE360	4	334.6	32	3217	50988	50	40	45	5.93	0.63	17.32
IPE400	4	373.0	32	3217	60715	70	40	45	5.03	0.64	16.11
IPE450	4	420.8	32	3217	72779	70	40	45	4.23	0.64	14.97
IPE500	4	468.0	40	5027	83800	70	50	55	5.66	0.64	14.00

The current perspective of this method defined by EN1994-1-2 is based on simple formulas and empirical coefficients that seem to be unsafe. Each component should be evaluate based on the evolution of the temperature of the component and the effect that it produces on the reduction of the material properties and geometry, such as the reduction of the elastic modulus and the effective section. The design value of the plastic resistance to axial compression and the effective flexural stiffness of the cross section is obtained by the balanced summation of the corresponding values of the four components. Strength and deformation properties of steel and concrete at elevated temperatures complies with the corresponding principles and rules of EN 1993-1-2 [5] and EN 1992-1-2 [6].

The stability of PEC requires the procedure identified by the Eq. (1) to (5). This procedure requires the calculation of the critical load  $N_{fi,cr,z}$ , taking into consideration the effective flexural stiffness  $(EI)_{fi,eff,z}$  and the plastic load  $N_{fi,pl,Rd}$ . Both quantities may be determined by the balanced summation method of the four components, being the effective flexural stiffness affected by the reduction coefficients given in accordance to EN1994-1-2 Annex G. The design for the axial buckling load of PEC under fire conditions depends on the reduction coefficient  $\chi_z$  and on the non-dimensional slenderness ratio  $\bar{\lambda}_\theta$ , when using the curve “c” of EN 1993-1-1 [7].

$$N_{b,fi,Rd,z} = \chi_z N_{fi,pl,Rd} \tag{1}$$

$$N_{fi,pl,Rd} = N_{fi,pl,Rd,f} + N_{fi,pl,Rd,w} + N_{fi,pl,Rd,c} + N_{fi,pl,Rd,s} \tag{2}$$

$$N_{fi,cr,z} = \pi^2 (EI)_{fi,eff,z} / L_\theta^2 \tag{3}$$

$$\bar{\lambda}_\theta = \sqrt{N_{fi,pl,Rd}/N_{fi,cr,z}} \tag{4}$$

$$(EI)_{fi,eff,z} = \varphi_{f,\theta} (EI)_{fi,f,z} + \varphi_{w,\theta} (EI)_{fi,w,z} + \varphi_{c,\theta} (EI)_{fi,c,z} + \varphi_{s,\theta} (EI)_{fi,s,z} \tag{5}$$

**2.1 New proposal**

After a previous analytical study, the simplified calculation method, Annex G, used for the design of PEC under fire was found to be sometimes unsafe or uneconomical. In order to improve the simple calculation method, a new proposal was made, providing new formulations, coefficients, tables and applications limits so that the calculation process of these elements is as close as possible to their real behaviour.

The improved method for the new proposal will be presented further on, regarding to evaluate and validate this model, using numerical simulations.

**2.1.1 Flange**

The new proposal used for the calculation of the average flange temperature  $\theta_{fi}$  is based on a bilinear approximation, as Eq. (6). There is a new proposal for the empirical coefficients  $k_t$  and new reference values  $\theta_{0,t}$ , as presented in Table 2. This new proposal also differentiates the type of profile, HEB or IPE.

$$\theta_{fi,t} = \theta_{0,t} + k_t (A_m/V) \tag{6}$$

**Table 2:** Parameters for average flange temperature

Standard Fire Resistance	HEB				IPE			
	10 < A <sub>m</sub> /V < 14		14 ≤ A <sub>m</sub> /V < 25		10 < A <sub>m</sub> /V < 19		19 ≤ A <sub>m</sub> /V < 30	
	θ <sub>0,t</sub> [°C]	K <sub>t</sub> [m°C]	θ <sub>0,t</sub> [°C]	K <sub>t</sub> [m°C]	θ <sub>0,t</sub> [°C]	K <sub>t</sub> [m°C]	θ <sub>0,t</sub> [°C]	K <sub>t</sub> [m°C]
R30	387	19.55	588	4.69	582	6.45	656	2.45
R60	665	14.93	819	3.54	824	3.75	862	1.72
R90	887	5.67	936	2.04	935	2.2	956	1.09
R120	961	4.29	998	1.62	997	1.68	1010	0.96

The average temperature allows the use of the same procedure to calculate the effective flexural stiffness and the plastic resistance to axial compression. Temperature is affecting the mechanical properties of the material without reduction of the second order moment of area and area of the flange.

**2.1.2 Web**

The fire effect on the web profile is defined by the 400°C isothermal criterion [8]. This criterion defines the web part that can be neglected,  $h_{w,fi}$ , with respect to the calculation of the resistance of this element. The new formulae includes the effect of the section factor, unlike the current version of EN1994-1-2. As an alternative to the current version, the new proposal presents a parametric expression, which depends on the section factor and fire rating, see Eq. (7) and Eq.(8). The application limits of these equations are defined by Table 3, and are differentiated for HEB and IPE profiles, respectively.

$$2h_{w,fi}/h_1 \times 100 = 0.0035t^2 (A_m/V) - 0.03t^{2.02} + (A_m/V)/2 \rightarrow (\text{HEB}) \tag{7}$$

$$2h_{w,fi}/h_1 \times 100 = 0.002t^2 (A_m/V) - 0.03t^{1.933} + (A_m/V) \rightarrow (\text{IPE}) \tag{8}$$

Where  $h_1$  represents the distance between the inner edges of the flange [mm] and  $t$  represents the fire rating [min].

**Table 3: Limits for web height reduction**

Standard Fire Resistance	Section Factor (HEB)	Section Factor (IPE)
	$A_m/V <$	$A_m/V <$
R30	22.22	30.00
R60	15.38	18.56
R90	12.22	14.97
R120	11.11	-

Temperature is affecting the second order moment of area and area of the web, without considering any reduction of the mechanical properties.

**2.1.3 Concrete**

The fire effect on the concrete is determined by the 500°C isothermal criterion. In this new proposal, the external concrete layer to be neglected makes distinction between both principal direction  $b_{c,fi,v}$  and  $b_{c,fi,h}$ , and is also affected by the section factor, Eq. (9). The coefficients are defined by Table 4 and Table 5, with their limits presented in Table 6.

$$b_{c,fi} = a(A_m/V)^2 + b(A_m/V) + c \tag{9}$$

**Table 4: Coefficients for concrete thickness reduction for HEB sections**

Standard Fire Resistance	$b_{c,fi,h}$ [mm]			$b_{c,fi,v}$ [mm]		
	a	b	c	a	b	c
	[m <sup>2</sup> .mm]	[m.mm]	[mm]	[m <sup>2</sup> .mm]	[m.mm]	[mm]
R30	0	0.0809	13.5	0	0.372	3.5
R60	0.1825	-4.2903	50	0.1624	-3.2923	41
R90	1.0052	-22.575	163.5	1.8649	-43.287	298
R120	0	7.5529	-35.5	0	6.0049	9

**Table 5: Coefficients for concrete thickness reduction for IPE sections**

Standard Fire Resistance	$b_{c,fi,h}$ [mm]			$b_{c,fi,v}$ [mm]		
	a	b	c	a	b	c
	[m <sup>2</sup> .mm]	[m.mm]	[mm]	[m <sup>2</sup> .mm]	[m.mm]	[mm]
R30	0	0.2206	10.5	0	0.9383	-3
R60	0.2984	-8.8924	93	0.5888	-15.116	135
R90	1.3897	-38.972	313	2.0403	-50.693	393
R120	0	18.283	-199	0	48.59	-537

**Table 6: Applications limits for average concrete temperature and thickness reduction**

Standard Fire Resistance	Section Factor	
	HEB	IPE
R30	$A_m/V < 25$	$A_m/V < 30$
R60	$A_m/V < 20$	$A_m/V < 23$
R90	$A_m/V < 17$	$A_m/V < 18$
R120	$A_m/V < 14$	$A_m/V < 15$

Where a, b and c are empirical coefficients. The new proposal allows the calculation of the average temperature of the residual concrete,  $\theta_{c,t}$ , according to equations (10) and (11). This procedure is based on the section factor as well as the fire rating [min], and the application limits are also defined by Table 6.

$$\theta_{c,t} = 3.1t^{0.5}(A_m/V) + 0.003t^{1.95} \rightarrow (\text{HEB}) \tag{10}$$

$$\theta_{c,t} = 2.67t^{0.5}(A_m/V) + 3.4t^{0.61} \rightarrow (\text{IPE}) \quad (11)$$

Temperature is affecting the second order moment of area and area of the concrete and also the mechanical properties of the concrete. This procedure allows the calculation of the reduction factor for the compressive strength of concrete  $k_{c,\theta}$  and the secant modulus  $E_{c,sec,\theta}$ , both affecting the effective flexural stiffness and plastic resistance to axial compression.

### 2.1.4 Reinforcement

The fire effect on the reinforcing steel bars depends of the calculation of the average temperature. A new parametric formula is presented to determine this effect, according to Eq. (12) and Eq. (13). This new formula takes into consideration the fire rating, the section factor as well as the geometrical average of axial distances  $u$ , being the  $u$  parameter determined according to EN1994-1-2.

$$\theta_{s,t} = 0.1t^{1.1}(A_m/V) + 7.5t - 0.1t^{1.756} - 8u + 390 \rightarrow (\text{HEB}) \quad (12)$$

$$\theta_{s,t} = 14(A_m/V) + 11t - 0.1t^{1.795} - 8u + 115 \rightarrow (\text{IPE}) \quad (13)$$

The temperature is affecting only the mechanical properties, allowing the calculation of the reduction factors, influencing both the effective flexural stiffness and the plastic resistance to axial compression.

## 3. Advanced calculation method

The calculation of the temperature field of PEC was done by the finite element method, using ANSYS [9] software based on the 3D modelling of the column with structural profiles. The finite element method requires the solution of Eq. (14) in the domain of the cross section,  $(\Omega)$  and Eq. (15) in the boundary  $(\partial\Omega)$ , when exposed to fire.

$$\nabla(\lambda_{(T)} \cdot \nabla T) = \rho_{(T)} \cdot C_{p(T)} \cdot \partial T / \partial t \quad (\Omega) \quad (14)$$

$$\lambda_{(T)} \cdot \nabla T \cdot \vec{n} = \alpha_c (T_g - T) + \Phi \cdot \epsilon_m \cdot \epsilon_f \cdot \sigma \cdot (T_g^4 - T^4) \quad (\partial\Omega) \quad (15)$$

In these equations  $T$  represents the temperature of each material;  $\rho_{(T)}$  defines the specific mass;  $C_{p(T)}$  defines the specific heat;  $\lambda_{(T)}$  defines the thermal conductivity;  $\alpha_c$  specifies the convection coefficient;  $T_g$  represents the gas temperature of the fire compartment, using standard fire ISO 834 around the cross section with 4 exposed sides;  $\Phi$  specifies the view factor;  $\epsilon_m$  represents the emissivity of each material;  $\epsilon_f$  specifies the emissivity of the fire;  $\sigma$  represents the Stefan-Boltzmann constant.

To perform a transient nonlinear thermal analysis, the three-dimensional Solid 70 was used, which has a 3D thermal conduction capability. The element has 8 nodes with a single degree of freedom, temperature, at each node.

The calculation of the displacement field uses element SOLID 185 to model the hot rolled steel and reinforcing bars. The SOLID 65 is used to model concrete. The SOLID 185 has eight nodes with three degrees of freedom at each node (displacements) and uses linear interpolating functions. The reduced integration method (Gauss point) was applied, taking into consideration the comparison of the critical load with the analytical method. The SOLID65 was elected to model concrete, presents eight nodes with three degrees of freedom at each node (displacements) and uses linear interpolating functions with full integration scheme (2x2x2 Gauss point). This element is going to be use to model the concrete part of the PEC.

The boundary conditions were imposed according to EN1991-1-2 on the external surface of the cross section and the initial condition of 20°C were defined to all nodes. The thermal

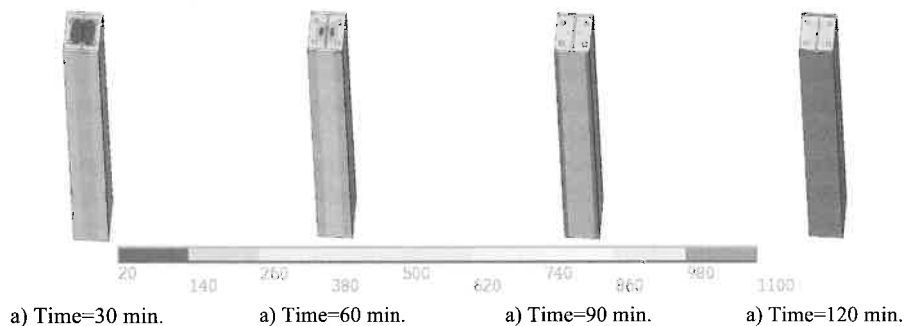
properties of the materials have been defined according to their own standards. For the concrete, a moisture contents of 3% and a thermal conductivity corresponding to its upper limit is recommended, according EN 1994-1-2. For steel, all thermal properties were assumed temperature dependent and in accordance to EN1993-1-2.

A convergence test was also made to determine the best mesh taking into account the time of each simulation and the computer capacity.

### 3.1 Nonlinear transient thermal analysis

The nonlinear transient thermal analysis was defined with an integration time step of 60s, which can decrease to 1s and increase up to 120s. The criterion for convergence uses a tolerance value of the heat flow, smaller than 0.1% with a minimum reference value of  $1 \times 10^{-6}$ .

The temperature field was determined for the total time of 7200s (R120), see examples for the simulation of PEC with HEB400. The Fig. 2 presents the 3D thermal results for columns exposed to ISO834 fire, after 30, 60, 90 and 120 minutes. The temperature field was recorded for the corresponding fire rating and applied as body load to the mechanical model. The mesh was defined after a solution convergence test.



**Fig. 2:** Numerical thermal 3D results for column HEB 400

### 3.2 Static and Eigen Buckling analysis

The numerical solution of a linear elastic buckling analysis was developed for each cross section, for each fire rating, for each buckling length and for PEC of two lengths. The total number of simulations was 576. In this simulations, everything was considered perfect (material and geometry). Critical load and buckling mode were determined. The critical load decreases with the non-dimensional slenderness.

### 3.3 Nonlinear buckling analysis

The buckling resistance of each PEC was calculated by the incremental displacement and iterative solution model using (Newton Raphson) method. The imperfection of the geometry was based on the elastic buckling mod shape with updating of the nodal coordinates. This update was based on the mode shape and based on the maximum imperfection expected on the mid high of the column, corresponding to  $L/150$ . Typical incremental displacement of 0.2 mm was applied, with minimum possible incremental displacement of 0.1 mm and maximum possible incremental displacement of 1 mm.

The criterion for convergence is based on displacement with tolerance value of 5%. The nonlinear buckling analysis is a static analysis with large deflection (equilibrium in deformed configuration), extended to a point where the structure reaches its ultimate limit state (plasticity,

modification into a mechanism). The buckling load bearing is the maximum load determined from the reaction on the bottom of the PEC.

A total of 96 simulations were performed, using twenty four different cross sections with, one column length 3m, using fixed end supports (buckling length equal to 0.5L) and for four fire resistance classes 30, 60, 90 and 120 minutes. According to the results, the buckling resistance decreases with the fire rating. The post buckling is affected by the increase of the time of the fire.

### 4. Comparison of results

The ratio between the critical load and the axial plastic resistance depends on the non-dimensional slenderness ratio and fits well with the new proposal used for the balanced summation model.

Fig. 3 presents the comparison between the critical load coming from analytical solutions and the results coming from the numerical solutions, for all the cross sections, for three boundary conditions and for four rating times, with PEC of 3m and 5m of length.

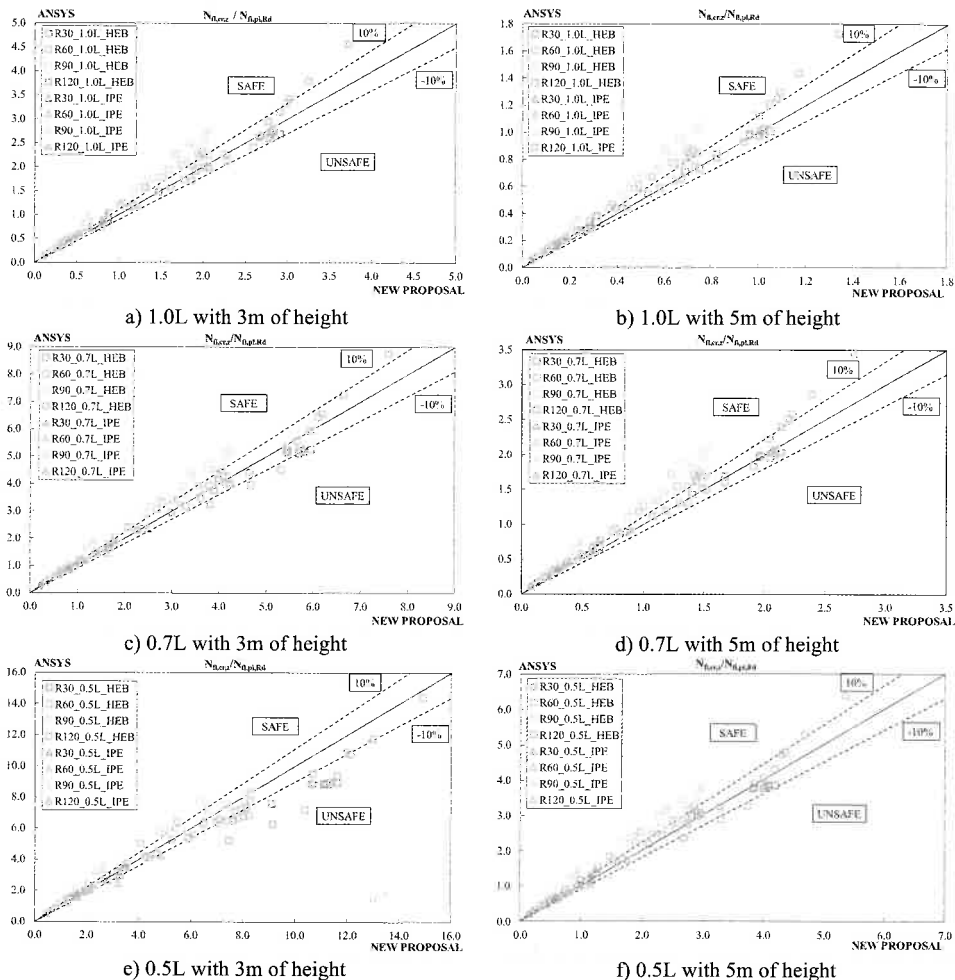


Figure 3: Critical load (comparison between ANSYS and new proposal)

The numerical solution method is based on the elastic buckling analysis considering the full resistance of the four components, taking into account the update of the material properties and the full geometry of column. This fact justifies that the numerical results coming from ANSYS are always higher than the results coming from the New Proposal. The worst results were obtained for the PEC with 3m length, probably due to the effect of the boundary conditions, being this more obvious for the smallest buckling length.

## **Conclusions**

This study was developed to evaluate the performance of the simple calculation method, used for the calculation of the buckling resistance of PEC. The simplified method proposed in Annex G EN1994-1-2 is unsafe when compared to the numerical results.

The results of new proposal are based on the same method using safer formulas, however, some improvements can be made for the flange, web and concrete components. The New Proposal is based on the balanced summation method, for this reason, only some part of this resistance is taking into consideration comparing with the numerical method with all the materials contribute for the global resistance of the column.

As expected, PEC based on HEB profile present higher critical load when compared with IPE profile. The critical load decreases with the non-dimensional slenderness in fire conditions.

The Eigen buckling results are in good agreement with the values defined by the new proposal.

The preliminary results of the buckling resistance analysis have revealed that a new buckling curve should be propose to define the reduction coefficient.

## **References**

- [1] Abdelkadir Fellouh, Nouredine Benlakehal, Paulo Piloto, Ana Ramos, Luís Mesquita. Load carrying capacity of partially encased columns for different fire ratings. *Fire Research*, Vol 1, No 1 (2016); 1:23, pp: 13-19, doi:10.4081/fire.2016.23
- [2] CEN - EN 1994-1-2. "Eurocode 4 – Design of composite steel and concrete structures – Part 1-2: general rules – Structural fire design". Brussels, August 2005.
- [3] ISO 834-1. "Fire-resistance tests. Elements of building construction. Part 1: general requirements". 1999.
- [4] Jungbluth, O. *Optimierte Verbandbauteile*. Köln: Stahlbau Verlags GmbH; 1982.
- [5] CEN EN 1993-1-2. "Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-2: general rules – Structural fire design". Brussels, April 2005.
- [6] CEN EN 1992-1-2. "Eurocode 2 – Design of concrete structures – Part 1-2: general rules – Structural fire design". Brussels, December 2004.
- [7] CEN - EN 1993-1-1; "Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules - Rules for buildings", European standards; Brussels, 2005. pp 91.
- [8] Cajot Louis-Guy, Gallois Louis, Debruyckere Rik, Franssen Jean-Marc, Simplified design method for slim floor beams exposed to fire, *Proceedings of the Nordic Steel Construction Conference*, Oslo, Norway, 5-7 September, 2012.
- [9] ANSYS® Academic Research, Release 16.2, Help System, Element reference, ANSYS Inc.